УДК 621.311.161

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ НАДЕЖНОСТИ СХЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Л.В. Кривова, А.В. Шмойлов

Томский политехнический университет
E-mail: faharlv@mail.ru

Показана эффективность предложенных практических расчетов показателей надежности схем электрических соединений за счет агрегации их состояний и вследствие этого исключения как расчетов показателей надежности расчетного объекта в составе агрегированных состояний, так и показателей самих состояний. Результаты могут быть использованы при проектировании и эксплуатации.

Существующие методы расчетов структурной надежности схем электрических соединений [1–6], базирующиеся на [1, 2], с помощью различных аналитических, расчетных, логических, интуитивных и других приемов позволяют осуществить декомпозицию схем относительно расчетного объекта (РО), благодаря чему упрощается структура схемы для определения показателей надежности РО.

Однако из-за больших объемов и трудностей формализации структурного анализа, требуемого для декомпозиции сложных схем, используют метод оценки структуры схем по режимному параметру. Так, в [4] в качестве параметра схем используется активная мощность перетока по элементу. Если эта мощность ниже заданного порога, то элемент в расчете структурной надежности схемы исключается, что обеспечивает некоторое упрощение структуры схемы или ее декомпозицию относительно РО.

Данный параметрический подход обеспечивает определенный эффект, однако требуются дополнительные многочисленные расчеты режимов работы схемы. Причем результаты применения этого метода не точно и не полно решают вопрос, т.к. порог устанавливается субъективно и нет гарантии, что принятый на основе результатов данного метода вариант упрощения является верным для всех или подавляющего количества возможных режимов загрузки элементов схем.

Общими существенными недостатками анализируемого параметрического и всех других известных методов является то, что они: 1) никак не упрощают и не совершенствуют расчеты показателей надежности в каждом из состояний схемы, которые необозримо множатся с усложнением последней и требуют все больше и больше ресурсов на данные весьма объемные и рутинные расчеты, 2) требуют выполнения многочисленных и объемных расчетов, связанных с выявлением и определением показателей каждого из состояний схем, чтобы учесть влияние показателей состояний схемы на результирующие показатели надежности.

В статистических задачах, которые по своей сути являются статическими и к которым относится также задача расчета структурной надежности схем электрических соединений, вопросы эквивалентирования и влияния явно обусловлены удельными весами эквивалентируемых объектов относительно расчетных. Аналогичная структурированность исходных данных в их компактном представлении в виде распределений вероятностей или основных статистических моментов (в первую очередь средних значений или математических ожиданий – МО) обеспечивает адекватное по структуре и однозначное формирование эквивалентов.

В связи с изложенным предлагается приближенный, но статистически обоснованный и простой для практической реализации подход к расчетам структурной надежности схем электрических соединений. Суть предложения состоит в следующем.

Величины показателей надежности по всему диапазону или группе состояний структуры схемы всегда имеют некоторый разброс от минимальных до максимальных значений. Надежность РО в нормальном состоянии схемы или в одном из состояний группы может быть наибольшей. Следовательно, такие показатели надежности РО как параметр потока аварийной потери и вероятность аварийного простоя для этих состояний схемы будут минимальными. Соответственно максимальные параметр потока аварийной потери и вероятность аварийного простоя РО могут оказаться в каком-то ремонтном или рабочем состоянии (группе состояний) схемы. Вклад составляющих в результирующие или усредненные показатели группы состояний можно проследить по выражениям и преобразованиям для среднего значения $\sum_{i=1}^{n_{рм}} p_{сх}^{рi} п_{ро}^{рi}$ показателя $П_{ро}^{р}$ РО (нижний индекс ро) по группе рабочих и ремонтных состояний (верхний индекс р), причем $n_{рм}$ – число ремонтных и рабочих состояний интересующей группы состояний, $п_{ро}^{рi}$ – значение параметра надежности РО в i-ом ремонтном или рабочем состоянии интересующей группы состояний схемы,   безусловная вероятность i-ого ремонтного или рабочего состояния схемы этой группы. Приведенное среднее значение по составу и структуре не отличается от выражения математического ожиданием (МО), но не является им. Преобразования названного среднего значения имеют вид:

$$\sum_{i=1}^{n_{\text{рм}}} p_{\text{сх}}^{\text{р}i} \text{п}_{\text{ро}}^{\text{р}i} = (\sum_{i=1}^{n_{\text{рм}}} \frac{p_{\text{сх}}^{\text{р}i}}{\sum_{i=1}^{n_{\text{рм}}} p_{\text{сх}}^{\text{р}i}} \text{п}_{\text{ро}}^{\text{р}i}) \sum_{i=1}^{n_{\text{рм}}} p_{\text{сх}}^{\text{р}i} =$$

$$= (\sum_{i=1}^{n_{\text{рм}}} p_{\text{сх}}^{\text{пр}i} \text{п}_{\text{ро}}^{\text{р}i}) p_{\text{сх}}^{\text{рм}} = m(\Pi_{\text{ро}}^{\text{рм}}) p_{\text{сх}}^{\text{рм}} = \text{п}_{\text{ро}}^{\text{ср}} p_{\text{сх}}^{\text{рм}},$$

где $p_{\text{сх}}^{\text{пр}i} = \dfrac{p_{\text{сх}}^{\text{р}i}}{\sum_{i=1}^{n_{\text{рм}}} p_{\text{сх}}^{\text{р}i}}$ – условная (приведенная к условиям или диапазону вероятностей состояний) вероятность i-ого ремонтного или рабочего состояния схемы интересующей группы состояний, $p_{\text{сх}}^{\text{рм}} = \sum_{i=1}^{n_{\text{рм}}} p_{\text{сх}}^{\text{р}i}$ – безусловная суммарная вероятность ремонтных и рабочих состояний интересующей группы состояний схемы,

$$\text{п}_{\text{ро}}^{\text{ср}} = m(\Pi_{\text{ро}}^{\text{р}}) = \sum_{i=1}^{n_{\text{рм}}} p_{\text{сх}}^{\text{пр}i} \text{п}_{\text{ро}}^{\text{р}i}$$

– усредненный показатель надежности $\Pi_{\text{ро}}^{\text{р}}$ расчетного объекта или его МО по диапазону ремонтных и рабочих состояний интересующей группы состояний схемы.

Отличительной особенностью последнего выражения является приведение вероятностей (удельных весов) к интересующему диапазону ремонтных и рабочих состояний схемы, благодаря чему среднее значение преобразовалось в МО.

В приведенных выражениях и преобразованиях представлены разные модификации вклада значений $\text{п}_{\text{ро}}^{\text{р}i}$ показателя надежности $\Pi_{\text{ро}}^{\text{р}}$ РО по выделенному диапазону ремонтных и рабочих состояний схемы. При этом в правой части данный вклад преобразован в произведение МО $m(\Pi_{\text{ро}}^{\text{р}})$ или среднего значения $\text{п}_{\text{ро}}^{\text{ср}}$ показателя надежности $\Pi_{\text{ро}}^{\text{р}}$ РО по выделенному диапазону ремонтных и рабочих состояний схемы на суммарную вероятность $p_{\text{сх}}^{\text{рм}}$ этих состояний. Неточное знание составляющих данного произведения несущественно повлияет на результирующие показатели надежности. При этом следует говорить только о неточности среднего значения $\text{п}_{\text{ро}}^{\text{ср}}$ показателей надежности, которое, для сокращения объема вычислений значений показателей надежности в каждом из состояний структуры схемы среднее значение $\text{п}_{\text{ро}}^{\text{ср}}$ приближенно оценивается как среднеарифметическое по минимальному $\text{п}_{\text{ро}}^{\text{и}}$ и максимальному $\text{п}_{\text{ро}}^{\text{а}}$ значениям, т.е. $\text{п}_{\text{ро}}^{\text{ср}} \cong \dfrac{\text{п}_{\text{ро}}^{\text{а}} + \text{п}_{\text{ро}}^{\text{и}}}{2}$.

Минимальное $\text{п}_{\text{ро}}^{\text{и}}$ и максимальное $\text{п}_{\text{ро}}^{\text{а}}$ значения должны быть обязательно вычислены. Хотя вычисление показателей надежности с любыми удельными весами не представляет трудностей, однако данная процедура включает множество интеллектуально-значащих операций (выбор расчетного пути приема или выдачи мощности, формирование расчетных совокупностей относительно РО для определения показателей надежности и состояний схемы, сортировка компонентов схемы и др.), требующих для автоматического их развертывания разработки или применения сложных разветвленных алгоритмов, которые целесообразно упростить или сократить.

Неточность приближенного показателя $\text{п}_{\text{ро}}^{\text{ср}}$ снижается при меньшей асимметрии удельных весов состояний. Это могло бы быть достигнуто путем подразделения всего диапазона состояний на группы с известными удельными весами этих состояний и сортировкой последних. Однако знание удельных весов состояний схемы возможно только после их расчета. Последнее заставляет отказаться от предлагаемой меры и в качестве альтернативы использовать естественные не сортируемые агрегированные группы состояний с приближенно усредненными по экстремальным значениям показателями надежности для каждой группы состояний. Показатели агрегированных групп состояний: параметры потоков входа в данные состояния и вероятности пребывания в последних при таком подходе целесообразно определять по наблюдаемой или расчетной статистике, например, по выражениям:

$$\omega_{\text{сх}}^{\text{р}w} = \frac{m_0^{\text{р}w}(\Delta t)}{\Delta t}, \quad p_{\text{сх}}^{\text{р}w} = \frac{t_{\text{сх}}^{\text{р}w}(\Delta t)}{\Delta t},$$

где Δt – календарный срок наблюдения, выражаемый обычно в годах, чаще всего равен одному году, $m_0^{\text{р}w}(\Delta t)$ – число случаев реализации специально учитываемых рабочих или ремонтных состояний схемы w-й агрегированной группы состояний за время наблюдения Δt, $t_{\text{сх}}^{\text{р}w}(\Delta t)$ – суммарное время реализации рабочих или ремонтных состояний схемы w-й агрегированной группы состояний за время наблюдения Δt.

Средняя продолжительность w-й агрегированной группы состояний находится как обычно через вероятность состояний этой группы $p_{\text{сх}}^{\text{р}w}$ и параметр потока входа в данную группу состояний $\omega_{\text{сх}}^{\text{р}w}$, т.е. $m(T_{\text{сх}}^{\text{р}w}) = p_{\text{сх}}^{\text{р}w}/\omega_{\text{сх}}^{\text{р}w}$.

Большинство практических схем электрических соединений электроустановок характеризуется небольшим количеством значащих состояний: нормальным, рабочими, ремонтными, удельные веса которых достаточно заметны, а показатели надежности разнообразны. В таких случаях необходимо определение показателей надежности РО во всех значащих состояниях, также экстремальных в диапазоне всех незначащих состояний, по которым приближенно вычисляется среднее значение и ему присваивается смысл МО. После этого можно найти показатели нормального и значащих рабочих и ремонтных состояний сети по статистике, аналогичной, используемой при определении показателей выделенных групп ремонтных состояний:

$$\omega_{\text{сх}}^{\text{р}v} = \frac{m_0^{\text{р}v}(\Delta t)}{\Delta t},\ p_{\text{сх}}^{\text{р}v} = \frac{t_{\text{сх}}^{\text{р}v}(\Delta t)}{\Delta t},\ \omega_{\text{сх}}^{\text{н}} = \frac{m_0^{\text{н}}(\Delta t)}{\Delta t},\ p_{\text{сх}}^{\text{н}} = \frac{t_{\text{сх}}^{\text{н}}(\Delta t)}{\Delta t},$$

где Δt – календарный срок наблюдения, выражаемый в годах, $m_0^{\text{р}v}(\Delta t)$, $m_0^{\text{н}}(\Delta t)$ – число случаев реализа-

ции учитываемого v-ого рабочего или ремонтного, нормального (индекс н) состояния схемы за время наблюдения Δt, $t_{\text{сх}}^{\text{р}v}(\Delta t)$, $t_{\text{сх}}^{\text{н}}(\Delta t)$ – суммарное время реализации v-го рабочего или ремонтного, нормального (индекс н) состояний схемы за время наблюдения Δt.

Суммарную вероятность группы состояний $p_{\text{сх}}^{\text{рм}}$ можно найти как вероятность противоположного события:

$$p_{\text{сх}}^{\text{рм}} = 1 - p_{\text{сх}}^{\text{н}} - \sum_{v=1}^{n_v} p_{\text{сх}}^{\text{р}v},$$

где n_v – число значащих или специально учитываемых значащих рабочих и ремонтных состояний схемы.

Показатели надежности расчетного объекта (РО) вычисляются аналогично [1, 2]. Предполагая рассчитанными показатели надежности РО в нормальном состоянии схемы $\omega_{\text{ро}}^{\text{н}}$, $p_{\text{ро}}^{\text{н}}$ в значащих рабочих состояниях схемы, отличных от нормального, или ремонтных состояниях $\omega_{\text{ро}}^{\text{р}v}$, $p_{\text{ро}}^{\text{р}v}$, экстремальных максимального $\omega_{\text{ро}}^{\text{рма}}$, $p_{\text{ро}}^{\text{рма}}$ и минимального $\omega_{\text{ро}}^{\text{рми}}$, $p_{\text{ро}}^{\text{рми}}$значений в выделенной группе незначащих рабочих или ремонтных состояний, можно по формуле полной вероятности получить результирующие показатели надежности РО, т.е.:

$$\omega_{\text{ро}}^{\text{рез}} = p_{\text{сх}}^{\text{н}}\omega_{\text{ро}}^{\text{н}} + \sum_{v=1}^{n_v} p_{\text{сх}}^{\text{р}v}\omega_{\text{ро}}^{\text{р}v} + p_{\text{сх}}^{\text{рм}}\frac{\omega_{\text{ро}}^{\text{рма}} + \omega_{\text{ро}}^{\text{рми}}}{2},$$

$$p_{\text{ро}}^{\text{рез}} = p_{\text{сх}}^{\text{н}} p_{\text{ро}}^{\text{н}} + \sum_{v=1}^{n_v} p_{\text{сх}}^{\text{р}v} p_{\text{ро}}^{\text{р}v} + p_{\text{сх}}^{\text{рм}}\frac{p_{\text{ро}}^{\text{рма}} + p_{\text{ро}}^{\text{рми}}}{2},$$

$$m(T_{\text{сх}}^{\text{рез}}) = p_{\text{ро}}^{\text{рез}} / \omega_{\text{ро}}^{\text{рез}}.$$

Опыт расчетов показателей надежности показал, что для ряда объектов электроэнергетики (электростанции, подстанции) минимальные показатели надежности РО имеют место в нормальном коммутационном состоянии, т.е. $\omega_{\text{ро}}^{\text{н}}=\omega_{\text{ро}}^{\text{и}}$, $p_{\text{ро}}^{\text{н}}=p_{\text{ро}}^{\text{и}}$, а других состояний с большим удельным весом нет. Тогда расчеты показателей надежности вырождаются в два варианта: для нормального коммутационного состояния и состояния, при котором они максимальны, т.е. $\omega_{\text{ро}}^{\text{а}}$, $p_{\text{ро}}^{\text{а}}$, а показатели состояний – до одного варианта, а, именно, показателей нормального состояния. Последнее согласно логике алгоритма определения показателей надежности фактически вырождается в единственный показатель состояния – вероятность нормального состояния $p_{\text{сх}}^{\text{н}} = \dfrac{t_{\text{сх}}^{\text{н}}(\Delta t)}{\Delta t}$ которая определяется простейшим и весьма надежным отношением времени пребывания в нормальном состоянии к календарному времени наблюдения. Все остальные рабочие и ремонтные состояния объединяются в единственную группу состояний Суммарная вероятность всех состояний этой группы схемы определяется как вероятность противоположного относительно нормального состояния события, т.е. $p_{\text{сх}}^{\text{рм}}=1-p_{\text{сх}}^{\text{н}}$. Результирующие показатели надежности РО для данного случая предстают в виде:

$$\omega_{\text{ро}}^{\text{рез}} = p_{\text{сх}}^{\text{н}}\omega_{\text{ро}}^{\text{н}} + p_{\text{сх}}^{\text{рм}}\frac{\omega_{\text{ро}}^{\text{н}} + \omega_{\text{ро}}^{\text{а}}}{2}, \quad p_{\text{ро}}^{\text{рез}} = p_{\text{сх}}^{\text{н}} p_{\text{ро}}^{\text{н}} + p_{\text{сх}}^{\text{рм}}\frac{p_{\text{ро}}^{\text{н}} + p_{\text{ро}}^{\text{а}}}{2},$$

$$m(T_{\text{сх}}^{\text{рез}}) = p_{\text{ро}}^{\text{рез}} / \omega_{\text{ро}}^{\text{рез}}.$$

Таким образом, приведенный алгоритм обеспечивает сокращение расчетов через уменьшение количества вариантов состояний схемы электрических соединений, т.е. исключаются выявление указанных коммутационных состояний сети и расчетов показателей этих состояний. Еще бóльшее сокращение расчетов и снижение объемов вычислений имеет место за счет исключения выявления расчетных совокупностей и расчетов показателей надежности в каждом из состояний, включенных в группы состояний сети, которые в противном случае должны были бы производиться в каждом из состояний схемы. Заметно сокращает затраты определение показателей состояний схемы не с помощью показателей некоторой определяющей ее совокупности компонентов и последующих расчетов показателей (параметров потока и вероятностей) для этой совокупности, а непосредственно сразу параметров потока и вероятностей интересующих состояний по результатам эксплуатационных наблюдений или расчетных оценок количества случаев и времени реализации соответствующих состояний. Представленные сокращения расчетов структурной надежности можно рассматривать как эшелонированную систему мероприятий, разворачиваемую в последовательности: декомпозиция состояний схемы относительно РО на отдельные состояния, группы состояний, одну группу состояний, определение показателей состояний, определение показателей надежности РО в каждом из выделенных конкретных состояниях, а также максимальных и минимальных значений указанных показателей для каждой из выделенных групп состояний, определение результирующих показателей надежности.

Расчет показателей надежности РО в нормальном состоянии структуры схемы и значащих состояниях, отличных от нормального, минимальных и максимальных показателей надежности в выделенных группах состояний могут производиться по любому из существующих методов расчета структурной надежности. Однако в последнем случае должен быть произведен выбор рабочих и ремонтных состояний структуры схемы электрических соединений, при которых показатели надежности РО максимальны и минимальны. Причем алгоритм выбора этих состояний должен быть таким же быстрым, как и приведенный выше алгоритм. Проведенный анализ позволил предложить и использовать следующую последовательность реализации данного алгоритма:

1. В нормальном состоянии работы схемы относительно РО выявляются расчетные совокупности последовательного соединения:
   - элементы и коммутационные аппараты, составляющие расчетные участки (РУ), – являющиеся также последовательными соединениями;
   - расчетные перемычки (РП) из двух или нескольких элементов, объединенных коммутационными аппаратами (как правило, выключателями), последовательное развитие

аварии в пределах компонентов которых через повреждение дугогасительных устройств коммутационных аппаратов приводит к аварийной потере РО;

- расчетно-взаимосвязанные элементы (РВЭ), состоящие из двух или нескольких элементов, могущих повредиться за счет одной причины и при этом происходит аварийная потеря РО;
- расчетные сложные сетевые совокупности (РССС) или структуры, включающие множество элементов, объединенных коммутационными аппаратами, совместное повреждение элементов которых за счет последовательного развития аварии через повреждение коммутационных аппаратов приводит к аварийной потере РО.

Делается это путем анализа влияния отключения каждого элемента и коммутационного аппарата РУ, также совокупностей элементов и коммутационных аппаратов на показатели надежности РО на пути от РО до объекта, обеспечивающего эффект функционирования РО, т.е. объекта генерации или потребления мощности.

2. Путем манипуляции выводимых из работы компонентов РП, РВЭ и РССС нормального состояния формируются рабочие, отличные от нормального, и ремонтные состояния сети относительно РО и среди них выделяются интересующие отдельные состояния и группы состояний.
3. Для каждого из состояний группы относительно РО выявляются РУ, РП, РВЭ и РССС. Путем суммирования параметров потока повреждений элементов и коммутационных аппаратов только для РУ находится расчетно-оценочный параметр потока (РОП) РО для каждого состояния схемы группы состояний.
4. Состояния схемы, в которых РОП соответственно максимален и минимален, являются искомыми состояниями данной группы состояний схемы, а сам РОП является приближенным максимальным и минимальным значением параметра потока аварийной потери РО в данной группе состояний схемы. Уточненные значения максимального и минимального параметров потоков РО определяются путем учета РП, РВЭ, РССС, если они имеют место в этих состояниях рассматриваемой группы состояний.

Для одной из схем электрических соединений энергосистемы произведены сопоставительные расчеты по полной практической методике [1, 2] и предлагаемой с описанными сокращениями, заменами и эквивалентами. Результаты отличаются в пределах 1 %.

Выводы

1. Предложенный метод оценки показателей структурной надежности схем электрических соединений существенно сокращает расчеты. Это обеспечивается тем, что расчет показателей надежности производится только для индивидуальных состояний, имеющих большой удельный вес, а маловероятные составляющие учитываются путем усреднения их экстремальных значений по группе этих состояний, кроме того исключаются расчеты показателей исключенных состояний, а для рассматриваемых состояний предложено заметное сокращение путем замены расчетов показателей совокупностей компонентов схемы, определяющих состояние, на непосредственное определение показателей состояний по времени.
2. Метод дает результаты, близкие к показателям надежности, рассчитанным по существующим методам, и может быть рекомендован для использования в эксплуатационной и проектной практике.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синьчугов Ф.И. Расчеты надежности схем электрических соединений. – М.: Энергия, 1971. – 198 с.
2. Шмойлов А.В. Практические расчеты надежности схем электрических соединений // Электричество. – 1982. – № 7. – С. 10–14.
3. Гук Ю.Б. Анализ надежности электроэнергетических установок. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
4. Фокин Ю.А., Туфанов В.А. Оценка надежности систем электроснабжения. – М.: Энергоиздат, 1981. – 224 с.
5. Китушин В.Г. Надежность энергетических систем. – М.: Высшая школа, 1984. – 282 с.
6. Розанов М.Н. Надежность электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 200 с.

Приложение

Для заданных двух РО (секции 10 кВ и трансформатора 20 МВА двухтрансформаторной подстанции), входящих в состав схемы электрических соединений сети, определены результирующие показатели надежности, таблица: параметр потока аварийной потери $\omega_{\text{ро}}^{\text{рез}}$ и вероятность аварийного простоя $p_{\text{ро}}^{\text{рез}}$. Выполнено это по методике [1, 2], также по предложенному приближенному методу с выделением нормального состояния, при котором показатели надежности были минимальны и при состоянии схемы, выявленным с помощью РОП, при котором они являются максимальными. Вероятность нормального состояния схемы, оцененная по времени пребывания в нем, оказалась равной 0,99. Тогда вероятности остальных незначащих рабочих и ремонтных состояний схемы равна 0,01.

Таблица. *Сопоставление показателей надежности*

Название показателей		По методу [1, 2]	По предложенному методу
Элемент схемы 23	$\omega_{\text{ро}}^{\text{рез}}$, 1/год	1,916	1,909
	$p_{\text{ро}}^{\text{рез}}$	0,00268	0,00268
Элемент схемы 53	$\omega_{\text{ро}}^{\text{рез}}$, 1/год	1,155	1,157
	$p_{\text{ро}}^{\text{рез}}$	0,00673	0,00672